

网络出版时间:2023-03-08 08:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2023.09.011
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20230306.1800.012.html

兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量对土壤 温度和湿度的响应

菅亚男¹,张秋良^{1,2},杨竞夫¹,关 蕾¹,黄明儒¹,张 泽¹,张永亮²,孙长磊²

(1 内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019;

2 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站,内蒙古 根河 022350)

【摘要】【目的】探究兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量、土壤温度、土壤湿度昼夜和不同月份的变化特征,进一步阐明土壤温度和湿度对土壤 N₂O 通量的调控机制。【方法】采用便携式 N₂O/CO CM-919 气体分析仪,于 2021 年生长季(6—9 月)对兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量和不同土层(2,10,20 cm)的土壤温度和湿度进行定点连续观测,分析土壤 N₂O 通量对土壤温度和土壤湿度的响应。【结果】(1)兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量呈“夜大昼小”的日变化特征,8 月中旬是土壤 N₂O 的“强排放”时期,月平均排放通量为 7.67 μg/(m²·h)。(2)当土壤日均温高于 15 °C 或昼夜温差较大(2.96~17.22 °C)时,土壤温度对土壤 N₂O 日排放通量发挥重要影响。当土壤日均湿度低于 20%时,土壤 N₂O 通量随湿度增加而增强;当土壤湿度处于 20%~30%或增至 30%以上时,对土壤 N₂O 通量的抑制作用较明显,湿润环境减弱了 N₂O 的排放。(3)土壤温度和湿度都是影响土壤 N₂O 通量月变化的主要环境因素,并存在显著的交互作用。【结论】在生长季内,兴安落叶松天然林土壤基本是 N₂O 的排放源,10 cm 土层土壤温度和湿度对土壤 N₂O 月通量变化影响显著,2 cm 土层土壤温度和 20 cm 土层土壤湿度对土壤 N₂O 日通量变化线性拟合解释率较高。

【关键词】 兴安落叶松天然林;土壤 N₂O 通量;土壤温度;土壤湿度

【中图分类号】 S791.222

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2023)09-0101-08

Response of soil N₂O flux of *Larix gmelinii* natural forest to soil temperature and moisture

JIAN Ya'nan¹,ZHANG Qiuliang^{1,2},YANG Jingfu¹,GUAN Lei¹,
HUANG Mingru¹,ZHANG Ze¹,ZHANG Yongliang²,SUN Changlei²

(1 Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;

2 Forest Ecosystem National Observation and Research Station of Daxing'anling, Genhe, Inner Mongolia 022350, China)

Abstract: 【Objective】 This study explored the diurnal and monthly variations of soil N₂O flux and soil temperature and moisture in *Larix gmelinii* natural forest and further clarified the roles of soil temperature and moisture in regulating soil N₂O flux. 【Method】 N₂O flux and soil temperature and moisture at different soil layers (2 cm, 10 cm and 20 cm) in *Larix gmelinii* natural forest were continuously observed by a closed-path Los Gatos N₂O/CO analyzer (model N₂O/CO CM-919) portable gas analyzer during the growing season of June to September in 2021. Then, the response of soil N₂O flux to soil temperature and

【收稿日期】 2022-05-30

【基金项目】 国家自然科学基金项目“寒温带兴安落叶松生态系统碳水交换过程与作用机理”(32060262)

【作者简介】 菅亚男(1997—),女,内蒙古包头人,在读硕士,主要从事森林可持续经营理论与技术研究。

E-mail:jayne97@emails.imau.edu.cn

【通信作者】 张秋良(1960—),男,内蒙古托克托人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林经理学与森林生态学研究。

E-mail:18686028468@163.com

moisture was analyzed. 【Result】 (1) Diurnally, soil N_2O flux in *Larix gmelinii* natural forest was high at night and low at daytime. Middle August was the strong emission period, and the average emission flux was $7.67 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. (2) When the daily mean temperature of soil was higher than 15°C or the temperature difference between daytime and night was large ($2.96-17.22^\circ\text{C}$), soil temperature plays an important role in the daily N_2O emission flux. When the daily mean moisture of soil was below 20% , N_2O flux was enhanced with the increase of soil moisture. When the soil moisture was at $20\%-30\%$ or increased above 30% , N_2O flux was inhibited, indicating that wet environment diminished soil N_2O emission. (3) Soil temperature and moisture were the main environmental factors affecting monthly variations of N_2O flux, and there were significant interactions. 【Conclusion】 During the growing season, *Larix gmelinii* natural forest was basically an emission source of soil N_2O . Soil temperature and moisture in 10 cm soil layer had significant influence on monthly flux of N_2O , and soil temperature in 2 cm soil layer and soil moisture in 20 cm soil layer had good linear fitting with the daily change of soil N_2O flux.

Key words: *Larix gmelinii* natural forest; soil N_2O flux; soil temperature; soil moisture

氧化亚氮(N_2O)是导致全球气候变暖的重要温室气体之一,其增温潜势约是 CO_2 的 298 倍,寿命超过 110 年^[1-2]。根据最新报道数据显示,目前大气中 N_2O 的平均体积分数达到了 $(333.2 \pm 0.1) \times 10^{-9}$,是工业化之前水平的 123%^[3],有效控制 N_2O 的排放是全球关注的科学问题。土壤 N_2O 主要来源于硝化、反硝化和化学还原过程,其中硝化细菌和反硝化细菌作用下的生物源 N_2O 占主导^[4-5],土壤温度和土壤湿度支配着森林土壤 N_2O 通量在时间尺度上的变异^[6]。此外,在土壤 N_2O 产生和消耗的过程中,关键功能微生物群落之间存在复杂的交互作用,土壤温度和湿度变化可影响土壤中有有机碳、pH 值、养分含量等,改变土壤微生物群落结构以及硝化和反硝化速率,导致 N_2O 变化量与不同影响因子之间表现为协同、随机和消长等耦合关系^[7]。研究土壤 N_2O 通量动态与土壤温度和湿度的关系,对深入探讨关键驱动因子调控土壤 N_2O 吸收与排放的机制至关重要。

有关土壤 N_2O 排放通量的研究与日俱增,先前大多集中在农田、湿地以及热带、亚热带和温带、暖温带地区的森林^[8-10],而全球 90% 以上的 N_2O 排放由微生物主导^[11]。世界范围内气候条件、土壤和植被类型等的空间异质性都会造成森林土壤 N_2O 排放速率的差异^[12],如热带和亚热带地区雨热同期,有利于土壤反硝化作用的发生,使得土壤 N_2O 排放速率最大,而温带森林土壤受水分条件限制造成其土壤 N_2O 排放速率较小^[13-14]。作为“东北亚”环境敏感区的寒温带大兴安岭林区,依靠冻土、湿地、森林相互作用,形成了以兴安落叶松为优势树种的大片明亮针叶林区,是欧亚大陆北方森林的重要组成部分,独特

的冷湿环境在一定程度上可能会限制土壤微生物的代谢活动及 N_2O 的排放通量,但相关的研究甚少。可见,寒温带兴安落叶松天然林生态系统中的氮交换过程、动态变化特征不容忽视。基于此,本研究采用便携式 N_2O/CO CM-919 气体分析仪,于 6—9 月在内蒙古大兴安岭试验区对兴安落叶松天然林土壤 N_2O 通量进行定期-连续-原位观测,探讨土壤 N_2O 昼夜和月变化规律以及土壤温度和湿度对其的调控作用,可为全面了解寒温带针叶林土壤 N_2O 变化规律提供数据参考,有助于科学预测森林土壤氮排放对全球气候变化的响应和产生的反馈作用。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站内的兴安落叶松天然林试验区($121^\circ30' \sim 121^\circ31'E, 50^\circ49' \sim 50^\circ51'N$),该站地处大兴安岭西北坡,平均海拔 800~1 000 m,属寒温带湿润气候区,具有寒冷湿润、冬长夏短、春秋相连、温差较大等大陆季风性气候特征;年均气温 -5.4°C ,无霜期 80~90 d;年降水量 450~550 mm,60% 集中在 7—8 月。该地区为低山山地,地带性土壤为棕色针叶林土,土壤平均厚度 10~20 cm,呈弱酸性(pH 为 4.5~6.5),区域内分布有大面积沼泽湿地和连续多年冻土^[15]。

试验区植被类型属于典型的寒温带明亮针叶林,乔木以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为主要建群树种,伴生有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*),森林覆盖率可达 75%,具有多样的植被类型及明显的分布特征,常见灌木和草本有杜鹃(*Rhododendron simsii*)、杜香(*Ledum*

palustre)、柴桦 (*Betula fruticosa*)、红花鹿蹄草 (*Pyrola incarnata*)、苔草 (*Carex duriuscula*) 等。因立地条件的差异及海拔高度的不同而呈现出各类森林类型,其中分布广且具代表性的是杜香-兴安落叶松林^[16]。

2 研究方法

2.1 样地设置

在兴安落叶松天然林试验区内选择1块面积为50 m×50 m的固定样地(121°30′32″E, 50°56′21″N),于试验开展前调查样地林分状况并测定土壤基本指标。样地海拔848 m,树种组成以兴安落叶松为主,平均胸径18.7 cm,平均树高16.2 m,郁闭度0.8,植被盖度达95%;土壤为棕色针叶林土,土壤厚度15~20 cm,土壤pH为5.58,有机碳含量8.8 g/kg,全氮含量357.2 mg/kg,铵态氮含量16.2 mg/kg,硝态氮含量36.8 mg/kg。为保证试验结果的代表性,在样地内随机设置3个面积为5 m×5 m、间隔10 m的样方,于试验开始前1周埋入土壤呼吸环(高10 cm、直径20 cm),露出地面2~3 cm,尽量不破坏土壤原状,整个试验过程中土壤环保持不动。样地布置完成后,在样地四周修建围栏,防止人员和动物的扰动。

2.2 气体采集

于2021年6—9月生长季,每月上、中、下旬各选择3 d进行土壤N₂O通量连续观测。观测时间为国际温室气体通用观测时间09:00—12:00。此外,分别于每月中旬进行土壤N₂O通量日变化观测,每3 h观测1次,从09:00开始至次日06:00结束,1 d中共取得8次数据。为减少环境因子的影响,观测均选择晴朗无风的典型晴天,利用美国LGR(Los Gatos Research)公司(现隶属于加拿大ABB)生产的便携式N₂O/CO CM-919气体分析仪自带土壤温湿度传感器,同步测定2,10,20 cm土层土壤温度和湿度。

2.3 N₂O通量测定

使用便携式N₂O/CO CM-919气体分析仪,采用闭路循环非稳态的动态密闭气室法,通过气相色谱仪分析N₂O浓度,并用气体变动模型^[17]将其转化为气体通量。

$$F_c = \frac{10VP_0(1 - \frac{W_0}{1000})}{RS(T_0 + 273.15)} \times \frac{\partial C'}{\partial t}$$

式中: F_c 为土壤被测气体通量($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),本

研究气体测定时间间隔以小时计,单位为 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; V 为系统内部总体积(cm^3); P_0 为气室初始气压(kPa); W_0 为气室初始水汽浓度(mmol/mol); R 为普适气体常数($8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{K} \cdot \text{mol})$); S 为土壤测量面积(cm^2); T_0 为气室初始气温($^\circ\text{C}$); $\frac{\partial C'}{\partial t}$ 为水校正后干的被测量气体的排放速率($1/(\mu\text{mol} \cdot \text{s})$)。

2.4 数据分析

利用Excel 2016和Origin 2020软件绘制图表,采用SPSS 26.0软件进行数据分析。土壤温度和湿度单因子与土壤N₂O通量的关系采用单因素方差(One-way ANOVA)分析,其交互作用采用一般线性模型(general linear model)计算。

3 结果与分析

3.1 兴安落叶松天然林土壤N₂O通量的变化特征

3.1.1 土壤N₂O通量的日变化特征 由图1可见,土壤N₂O通量表现出排放与吸收交替变化的日动态规律,不同月份的日变化幅度有所不同。06-18土壤N₂O通量自09:00达到日最大排放量7.94 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 后缓慢下降,15:00出现最小值-3.37 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;07-16土壤N₂O在日间呈现负值弱吸收状态,在夜间土壤N₂O呈现持续排放的状态;08-15土壤全天释放N₂O,09:00—18:00出现小幅波动,12:00排放量最小为4.47 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,夜间排放明显高于其他时间段,03:00排放增强到峰值19.74 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;09-12,土壤N₂O逐渐下降,夜间波动剧烈。

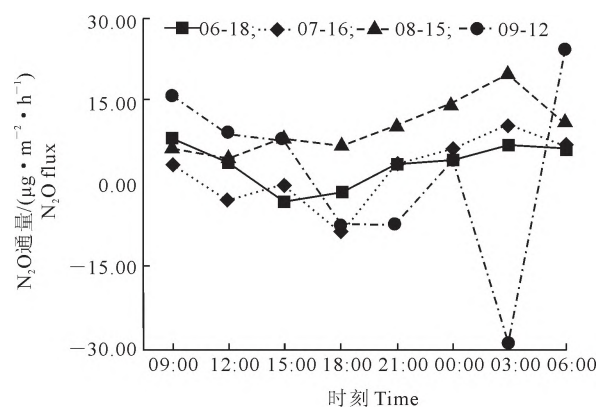


图1 兴安落叶松天然林土壤N₂O通量的日变化特征

Fig. 1 Diurnal variation of soil N₂O flux in

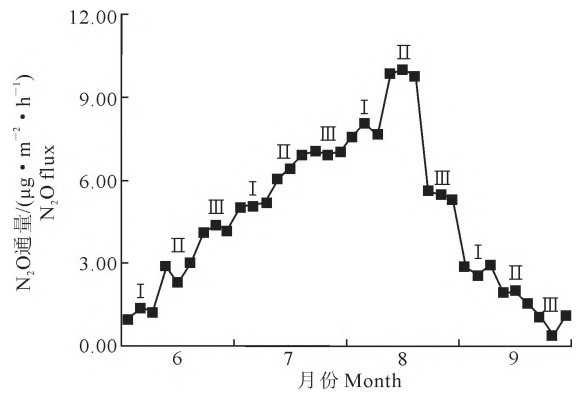
Larix gmelinii natural forest

总体而言,4个观测日土壤N₂O日通量平均为1.83~10.17 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,顺序依次为08-15>06-18>07-16>09-12。在凌晨、正午和傍晚交替时段

土壤温度和湿度波动明显,除 08-15 外,其他各月观测日内土壤 N₂O 通量日变化均呈半吸收半排放状态。4 个观测日中仅 09-12 的 N₂O 昼均值超过日均值和夜均值,其他 3 个观测日均为土壤 N₂O 排放量的夜均值>日均值>昼均值,三者间差异较大,夜间(当日 18:00 至次日 06:00)N₂O 排放量占整日排放量的 67.8%~75.4%,03:00 是土壤 N₂O 的“强排放”时段。

3.1.2 土壤 N₂O 通量的月变化特征 由图 2 可见,6-9 月兴安落叶松天然林土壤是 N₂O 的主要排放源,土壤 N₂O 通量表现为“单峰型”月变化特征。6 月开始土壤解冻,土壤微生物活性增强,土壤 N₂O 排放增加,但受表层土壤蒸发的影响,导致土壤水分降低,因此土壤 N₂O 通量在 6 月中旬和下旬均有一天出现了略微下降。进入植被生长旺季(7 和 8 月),土壤温度和湿度大幅增加,温湿环境有利于土壤微生物的硝化和反硝化作用,N₂O 排放波动式递增,基本维持在一个较高的水平,整个生长季节的排放峰值出现在 8 月中旬,最大排放量为 9.98 μg/(m²·h)。8 月下旬日照辐射减弱后土壤降温明显,土壤 N₂O 排放通量骤然下降。9 月之后天气转冷,土壤 N₂O 排放通量逐渐下降,最小值仅 0.39 μg/(m²·h)。由此可知,6-9 月土壤 N₂O 月平均

通量排序为 8 月(7.67 μg/(m²·h))>7 月(6.14 μg/(m²·h))>6 月(2.70 μg/(m²·h))>9 月(1.82 μg/(m²·h))。



I、II、III 分别表示各月的上旬、中旬、下旬。图 5 同 I、II、III indicate early, middle and late ten-day of every month, respectively. The same for Fig. 5

图 2 兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量的月变化特征 Fig. 2 Monthly variation of soil N₂O flux in *Larix gmelinii* natural forest

3.2 兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量日动态与土壤温度和湿度的关系

3.2.1 土壤 N₂O 通量日动态与土壤温度的关系 兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量和土壤温度的日动态变化见图 3。

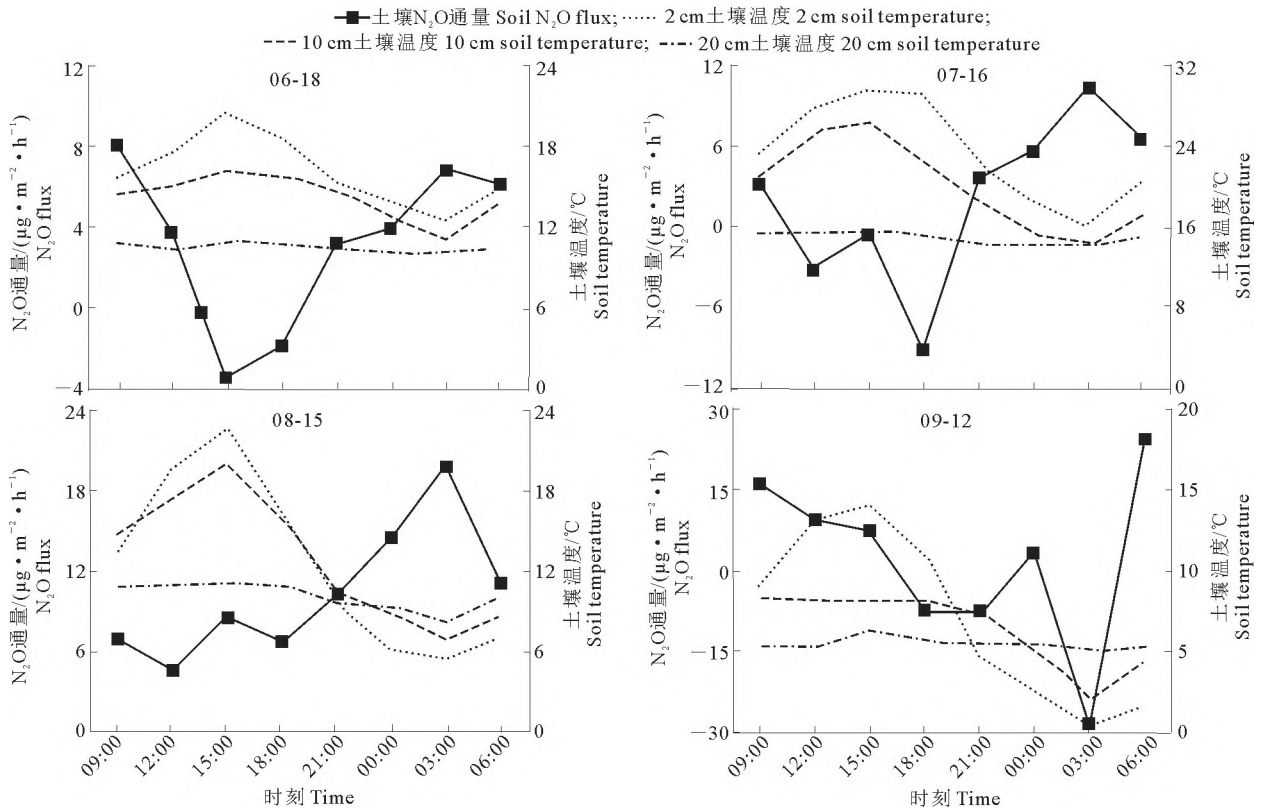


图 3 兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量和土壤温度的日动态变化

Fig. 3 Diurnal variation of N₂O flux and soil temperature in *Larix gmelinii* natural forest

由图 3 可见,随土层深度的增加,土壤温度降低。生长季内地表植被覆盖度高,土壤温度变化滞后于空气温度。受土壤蒸发散热增强影响,正午时土壤温度升高缓慢,峰值集中在午后 15:00,日最低温出现在次日凌晨 03:00。08-15 和 09-12, 20 cm 土层土壤温度在 21:00—06:00 略高于 2 cm 和 10 cm 土层土壤温度,这是因为随时间推移,土壤昼夜温差增大,日出后表层土壤吸热向深层土壤传递,太阳辐射减弱导致土壤热量积累不足,夜晚冷空气流动较快,表层土壤放热速率明显快于深层土壤。

由表 1 可知,除 09-12 外,土壤 N₂O 通量与土壤温度呈负相关关系。结合图 3,当土壤温度日均值高于 15 °C 时,土壤 N₂O 通量变化与土壤温度密切相关。06-18 土壤 N₂O 通量仅与 2 cm 土层土壤温度呈显著负相关($P < 0.05$);07-16 土壤 N₂O 通量与 2,10 cm 土层土壤温度呈极显著($P < 0.01$)和显著负相关($P < 0.05$);08-15 土壤 N₂O 通量与 2, 10 cm 土层土壤温度呈显著负相关($P < 0.05$),与 20 cm 土层土壤温度呈极显著负相关($P < 0.01$),说明土壤温度昼夜温差较大(2.96~17.22 °C)时,对土壤 N₂O 排放也起到调控作用;09-12 土壤 N₂O

通量与不同土层土壤温度均呈正相关,但相关性不显著。

表 1 兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量与土壤温度的相关性
Table 1 Correlation coefficient between N₂O flux and soil temperature in *Larix gmelinii* natural forest

不同土层温度 Soil temperature	土壤 N ₂ O 通量 Soil N ₂ O flux			
	06-18	07-16	08-15	09-12
2 cm	-0.679*	-0.829**	-0.605*	0.076
10 cm	-0.460	-0.614*	-0.656*	0.149
20 cm	-0.236	-0.365	-0.865**	0.009

注:*. $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。下同。

Note: * $P < 0.05$ and ** $P < 0.01$. The same below.

3.2.2 土壤 N₂O 通量日动态与土壤湿度的关系

由图 4 可见,随土层深度的增加,土壤湿度增加。2 cm 土层土壤湿度受日照和降雨的影响显著,中午时分辐射增强,蒸发速度随之加快,土壤湿度明显降低。06-18 午后短暂降雨,使得土壤湿度出现骤升的趋势;08-15 夜间温度较低,表层土壤水分易凝结,土壤湿度最小。天然林林下较厚的腐殖质层会滞留一部分雨水,使得 10 cm 土层土壤湿度短期内变化幅度不大;在植被生长季内气温升高、雨水充沛,表层水分向下渗入,深层冻土完全消融,水分运动呈上移状态,使得 20 cm 土层土壤湿度稳定在较高水平。

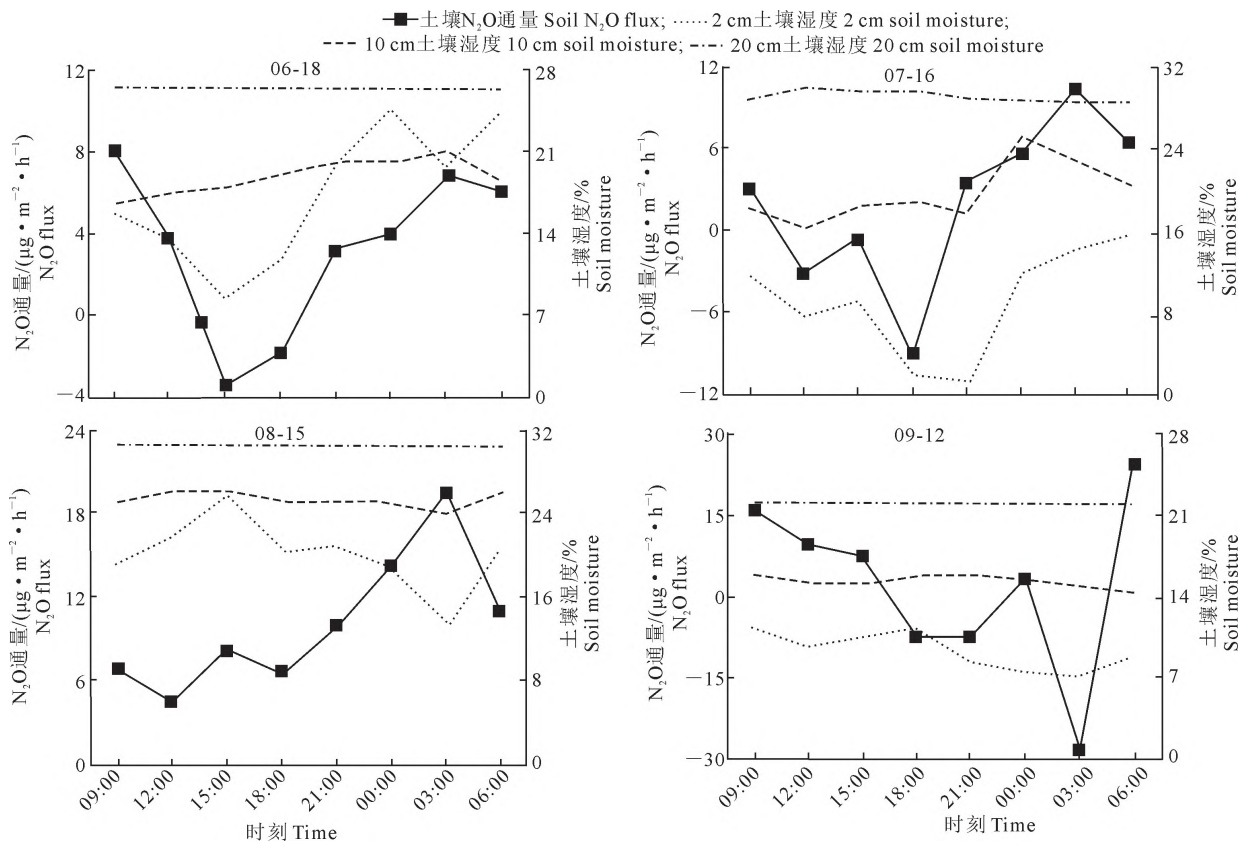


图 4 兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量和土壤湿度的日动态变化

Fig. 4 Diurnal variation of N₂O flux and soil moisture in *Larix gmelinii* natural forest

兴安落叶松天然林土壤 N_2O 通量与土壤湿度的相关性见表 2。

表 2 兴安落叶松天然林土壤 N_2O 通量与土壤湿度的相关性

Table 2 Correlation coefficient between N_2O flux and soil moisture in *Larix gmelinii* natural forest

不同土层湿度 Soil moisture	土壤 N_2O 通量 Soil N_2O flux			
	06-18	07-16	08-15	09-12
2 cm	0.445	0.484	-0.534*	0.214
10 cm	0.003	0.364	-0.538*	0.051
20 cm	-0.613*	-0.773*	-0.801**	0.083

由表 2 可知,06-18 和 07-16 土壤 N_2O 通量与 2,10 cm 土层土壤湿度呈正相关,但相关性不显著,而与 20 cm 土层土壤湿度呈显著负相关($P < 0.05$);结合图 4,08-15 的 2,10 cm 土层土壤湿度稳定维持在 20%~30%,土壤 N_2O 通量与不同土层土壤湿度均呈负相关,显著影响土壤 N_2O 通量($P < 0.05$),20 cm 土层土壤湿度增加到 30%以上,对土壤 N_2O 排放产生极显著影响($P < 0.01$),土壤湿度增大

土壤 N_2O 排放反而减弱;09-12 土壤湿度逐渐降低,但各土层湿度对土壤 N_2O 通量的影响均未达到显著水平。

3.3 兴安落叶松天然林土壤温度和湿度的交互作用对 N_2O 通量月动态的影响

由图 5 可见,10 cm 土层土壤温度和土壤湿度随时间推移均呈先升高后降低的“单峰型”月变化特征。6 月气温逐渐回暖,土壤表层积雪和深层冻土消融,土壤保持较高水分状态,随着土壤温度逐渐升高,土壤湿度小幅下降。7 月该地区雨热同期,土壤温度和湿度均持续上升,土壤 N_2O 排放也随之增加,温湿的土壤环境对土壤微生物活动和有机质分解起到积极促进作用。对于寒温带森林而言,较高的土壤温度在一定程度上会抑制土壤 N_2O 的排放,因此 8 月中旬土壤 N_2O 达到排放高峰,是土壤 N_2O 的强排放时期。9 月以后气温和降雨递减,表层土壤在夜间出现轻微冻结现象,土壤 N_2O 排放随之减弱。

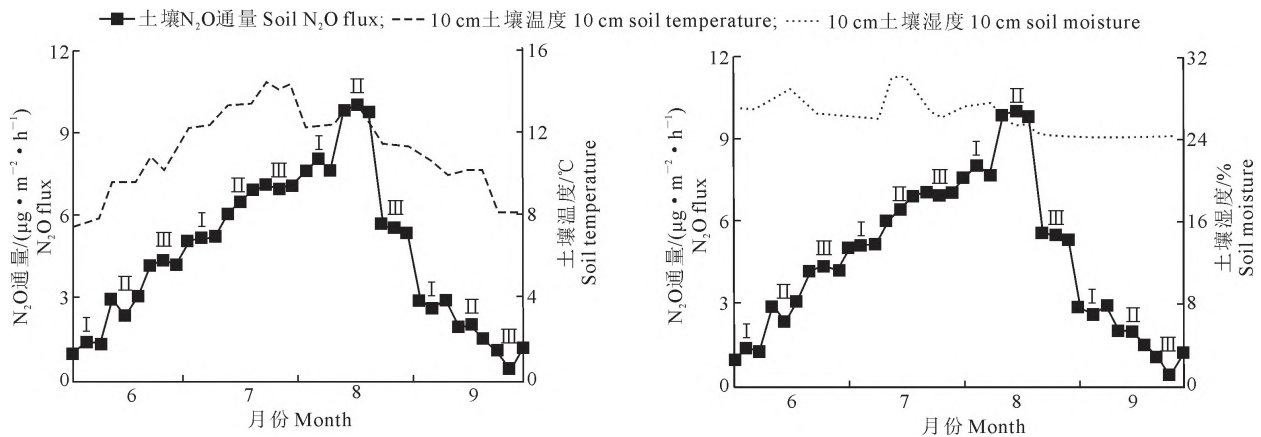


图 5 兴安落叶松天然林土壤 N_2O 通量和 10 cm 土壤温度、湿度的月动态变化

Fig. 5 Monthly variation of N_2O flux and 10 cm soil temperature and moisture in *Larix gmelinii* natural forest

相关分析表明,6—9 月兴安落叶松天然林 10 cm 土层土壤温度和湿度月变化受气温、降雨、季节性冻土融水等环境变化影响较小,土壤 N_2O 通量与 10 cm 土层土壤温度和湿度同步变化,且土壤 N_2O 通量与 10 cm 土壤温度呈极显著($F = 42.232^{**}$)正相关,与 10 cm 土壤湿度呈显著($F = 9.509^{*}$)正相关。可见,土壤温度和湿度都是调控 N_2O 排放月变化的关键因素,且土壤温度的影响效应更强($P < 0.01$)。在生长季内,土壤温度和湿度对 N_2O 排放通量存在显著的交互作用($F = 13.889^{*}$, $P < 0.05$)。

4 讨论

4.1 兴安落叶松天然林土壤 N_2O 通量变化特征

N_2O 是一种重要的温室气体,由土壤微生物介

导,硝化和反硝化作用是土壤 N_2O 排放的主要途径^[17]。本研究中,6—9 月生长季节内寒温带兴安落叶松天然林土壤 N_2O 呈持续排放状态,在 8 月中旬前后达到峰值,远高于其他月份的观测值。这可能是因为 8 月植被生长旺盛,土壤 NH_4^+-N 逐渐积累,养分含量最高,加之雨季土壤含水量较高,促进了土壤微生物的活动,有助于加速土壤有机质分解,致使土壤 N_2O 排放增强^[18],这与不同地区森林土壤 N_2O 排放规律^[19-20]相符。本研究中,土壤 N_2O 通量的日变化特征表现为日间土壤 N_2O 处于吸收-排放交替状态,排放峰值通常出现在夜间时段(除 09-12 外),占整日排放量的 67.8%~75.4%,这与徐晔晖^[21]的研究结论一致,呈“夜大昼小”的特征。这可能是因为该地区土壤微生物长期适应寒冷潮湿

的环境,植物生长季高温天气使得土壤温度迅速升高,抑制了 N₂O 的快速排放;而在夜间土壤温度偏低,蒸发减弱,土壤湿度较大,硝化细菌和反硝化细菌活动力增强,促进 N₂O 排放量大幅增加。

4.2 兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量对土壤温度和湿度的响应

土壤温度和湿度是影响土壤微生物硝化和反硝化作用的关键驱动因素^[22]。本研究中,6—9月生长季兴安落叶松天然林土壤温度和湿度与土壤 N₂O 排放协同变化,存在显著的交互作用。一定范围内,温度升高和湿度增加可以促进土壤微生物活性及酶活性,进而加速硝化反硝化过程,有利于土壤 N₂O 排放^[23]。相关研究表明,15~35℃为土壤硝化作用微生物活动的适宜温度^[24],但由于大兴安岭地区年平均气温较低,土壤微生物长期适应较冷环境,过高的温度反而会减弱微生物活性,导致土壤 N₂O 排放量下降^[25]。本研究发现,当土壤温度日均值高于 15℃或昼夜温差较大(2.96~17.22℃)时,该地区土壤 N₂O 通量与土壤温度呈显著或极显著关系;而在月变化中,随着土壤温度的升高,土壤 N₂O 排放量增加,这与高德才等^[26]的研究结果相一致,进一步说明土壤温度是影响土壤 N₂O 通量变化的主导因素。同时,本研究发现,当土壤湿度低于 20%时,土壤 N₂O 通量随湿度增加而增强。祁金花等^[27]研究表明,土壤湿度是影响土壤 N₂O 排放的因子之一,但显著程度与不同土壤环境密切相关。当土壤湿度在 20%~30%或增至 30%以上时,土壤湿度对该地区 N₂O 排放表现出明显的抑制作用。这可能是由于生长季内午间阳光辐射强烈,季节性降雨且雨量较少导致土壤蒸发过程远快于增湿过程,土壤湿度在 20%左右达到饱和,较高水分条件下土壤呈淹水状态造成土壤缺氧,N₂O 还原酶和亚硝酸酶活性提高,使得反硝化细菌进一步将 N₂O 还原成 N₂,从而降低了 N₂O 通量^[28-29]。综上,土壤 N₂O 的排放是一个复杂的物理、化学和生物学过程,欲全面掌握寒温带兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量变化机制,除了要分析土壤水热条件的影响外,还需对土壤理化性质变化以及功能微生物驱动机制进行深入研究和探讨^[30]。

5 结 论

1)寒温带兴安落叶松天然林土壤 N₂O 通量日动态呈现明显的排放-吸收交替变化,表现出强烈的时间异质性。除 09-12 外,各观测日土壤 N₂O 夜间

排放占整日排放量的 67.8%~75.4%;6—9月生长季内,土壤是 N₂O 排放源,8月是土壤 N₂O 的“强排放”时期,并于 8月中旬前后达到峰值,远高于其他时段的观测值。

2)当土壤温度日均值高于 15℃或昼夜温差较大(2.96~17.22℃)时,土壤温度对土壤 N₂O 日排放通量发挥重要影响。当土壤湿度日均值低于 20%时,土壤 N₂O 通量随湿度增大而增加;处于 20%~30%或高于 30%时,土壤湿度与土壤 N₂O 通量呈显著或极显著负相关关系,说明湿润环境减弱了 N₂O 的排放。

3)10 cm 土壤温度和湿度是影响土壤 N₂O 通量月变化的主要因子,并对土壤 N₂O 排放存在显著交互作用。相较于土壤湿度,土壤温度对土壤 N₂O 排放的影响效应更强。

[参考文献]

- [1] Mackay A. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(6): 2407.
- [2] Zhou B T, Chao Q C, Huang L. The core conclusions and interpretation of working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. Chinese Journal of Urban and Environmental Studies, 2015, 3(1): 1550003.
- [3] Tian H Q, Xu R T, Canadell J G, et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks [J]. Nature, 2020, 586(7828): 248-256.
- [4] 冯 洁, 张克强, 陈 思, 等. 土壤 N₂O 吸收和消耗机制及研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2084-2089. Feng J, Zhang K Q, Chen S, et al. Mechanism of N₂O uptake and consumption by soil: a review [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2084-2089.
- [5] 宋雅琦, 王 玲, 李 昆, 等. 土壤微生物还原 N₂O 机制及其研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42(9): 82-90. Song Y Q, Wang L, Li K, et al. The mechanism and research progress of soil microorganism reducing N₂O [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(9): 82-90.
- [6] 刘 硕, 李玉娥, 孙晓涵, 等. 温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1093-1098. Liu S, Li Y E, Sun X H, et al. Effects of temperature and soil moisture on greenhouse gases emission of temperate forest soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1093-1098.
- [7] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 等. 大气氮沉降对森林土壤甲烷吸收和氧化亚氮排放的影响及其微生物学机制 [J]. 生态学报, 2013, 33(11): 2084-2089.

- 2014,34(17):4799-4806.
- Fang H J, Cheng S L, Yu G R, et al. Microbial mechanisms responsible for the effects of atmospheric nitrogen deposition on methane uptake and nitrous oxide emission in forest soils: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4799-4806.
- [8] 李发东, 杜 锐, 张秋英, 等. 华北平原农田 N_2O 排放通量的高频动态观测 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 195-202.
- Li F D, Du K, Zhang Q Y, et al. High-frequency dynamic observation of N_2O emission flux from cropland in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2): 195-202.
- [9] 朱晓艳, 宋长春, 郭跃东, 等. 三江平原泥炭沼泽湿地 N_2O 排放通量及影响因子 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(12): 2228-2234.
- Zhu X Y, Song C C, Guo Y D, et al. N_2O emissions and its controlling factors from the peatlands in the Sanjiang Plain [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(12): 2228-2234.
- [10] 张 哲, 王邵军, 陈闽昆, 等. 西双版纳不同演替阶段热带森林土壤 N_2O 排放的时间特征 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 702-708.
- Zhang Z, Wang S J, Chen M K, et al. Temporal characteristics of soil N_2O emission of different succession stages in Xishuangbanna tropical forests [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(4): 702-708.
- [11] 庄 炜, 杨雪琴, 于晓莉, 等. 微生物驱动的滨海湿地 N_2O 产生及其机制研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2019, 46(12): 3440-3452.
- Zhuang W, Yang X Q, Yu X L, et al. N_2O generation by microbes in coastal wetlands: a review [J]. *Microbiology China*, 2019, 46(12): 3440-3452.
- [12] Yan J H, Zhang W, Wang K Y, et al. Responses of CO_2 , N_2O and CH_4 fluxes between atmosphere and forest soil to changes in multiple environmental conditions [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(1): 300-312.
- [13] 陈朝琪, 吴君君, 黄永梅, 等. 中亚热带 2 种天然林表层土壤 N_2O 排放速率 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2014, 9(3): 53-60.
- Chen C Q, Wu J J, Huang Y M, et al. Soil N_2O emission rates of two natural forests in mid-subtropical China [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014, 9(3): 53-60.
- [14] Xu R, Prentice I C, Spahni R, et al. Modelling terrestrial nitrous oxide emissions and implications for climate feedback [J]. *New Phytologist*, 2012, 196(2): 472-488.
- [15] 李小梅, 张秋良. 环境因子对兴安落叶松林生态系统 CO_2 通量的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(8): 31-39.
- Li X M, Zhang Q L. Impact of climate factors on CO_2 flux characteristics in a *Larix gmelinii* forest ecosystem [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(8): 31-39.
- [16] 王 冰, 张鹏杰, 张秋良. 不同林型兴安落叶松林土壤理化特征 [J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(6): 65-71.
- Wang B, Zhang P J, Zhang Q L. Soil physicochemical characteristics of *Larix gmelinii* forest with different forest types [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(6): 65-71.
- [17] 王皓左. 去凋、断根和氮添加对兴安落叶松天然林土壤 N_2O /CO 通量影响研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- Wang H Z. Effects of no litter, root cutting and N addition on soil N_2O /CO flux in natural *Larix gmelinii* forest [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [18] 吴祥文. 大兴安岭多年冻土区不同林型土壤主要温室气体通量特征及气候变化的响应 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2021.
- Wu X W. Soil greenhouse gas fluxes of different forest types and their responses to climate change in permafrost regions of Daxing'an Mountains, Northeast China [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2021.
- [19] 沈菊培, 贺纪正. 微生物介导的碳氮循环过程对全球气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 2957-2967.
- Shen J P, He J Z. Responses of microbes-mediated carbon and nitrogen cycles to global climate change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 2957-2967.
- [20] 魏 华. 温带落叶阔叶林和热带山地雨林土壤温室气体排放规律及其影响因子 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- Wei H. Soil greenhouse gas emission and its influencing factors from temperate deciduous broad-leaved forest and tropical mountain rain forest [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [21] 徐映晖. 太行山南麓刺槐人工林土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量变化特征及其耦合关系 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Xu D Y. Variation and coupling of soil CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in a *Robinia pseudoacacia* plantation in the south of the Taihang Mountains [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [22] 梁东哲, 赵雨森, 辛 颖. 大兴安岭重度火烧迹地天然次生林土壤温室气体通量及其影响因子 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 777-784.
- Liang D Z, Zhao Y S, Xin Y. Soil greenhouse gases fluxes and the affecting factors of natural secondary forest from seriously burned area in Greater Khingan Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 777-784.
- [23] 韩 琳, 王 鸽, 王 伟, 等. 全球森林土壤 N_2O 排放通量的影响因子 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 446-452.
- Han L, Wang G, Wang W, et al. Factors affecting global forest soil N_2O emission flux [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 446-452.
- [24] 韩 雪, 陈宝明. 增温对土壤 N_2O 和 CH_4 排放的影响与微生物机制研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3906-3914.
- Han X, Chen B M. Progress in the effects of warming on soil N_2O and CH_4 emission and the underlying microbial mechanisms [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11): 3906-3914.

(下转第 118 页)

- zone drying results in improved water use efficiency, drought tolerance and leaf carbon balance of grapevines (*Vitis labrusca*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 134: 82-95.
- [36] Fromme P, Melkozernov A, Jordan P, et al. Structure and function of photosystem: I. Interaction with its soluble electron carriers and external antenna systems [J]. *FEBS Letters*, 2003, 555(1): 40-44.
- [37] 张敏, 李燕, 宁朋, 等. 叶面及根际施用外源 NO 对盐胁迫下中华常春藤生理特性的影响 [J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(3): 583-592.
- Zhang M, Li Y, Ning P, et al. Effects of applying exogenous NO with foliar and rhizosphere methods on physiological characteristics of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* under salt stress [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(3): 583-592.
- [38] Avestan S, Ghasemnezhad M, Esfahani M, et al. Effects of nano-silicon dioxide on leaf anatomy, chlorophyll fluorescence, and mineral element composition of strawberry under salinity stress [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2021, 44(20): 3005-3019.
- [39] 黄炳川. 鼠李糖脂和纳米硅肥对棉花耐盐特性的影响 [D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- Huang B C. Effects of rhamnolipid and nano silicon fertilizer on salt tolerance of cotton [D]. Ala'er, Xinjiang: Tarim University, 2022.
- [40] 王斌, 张腾霄, 刘超群, 等. 非生物胁迫对药用植物活性氧代谢影响的研究进展 [J]. *现代中药研究与实践*, 2022, 36(3): 94-98.
- Wang B, Zhang T X, Liu C Q, et al. Research progress in the effects of abiotic stress on reactive oxygen species metabolism in medicinal plants [J]. *Research and Practice on Chinese Medicines*, 2022, 36(3): 94-98.
- [41] 张阳, 李瑞莲, 张德胜, 等. 涝渍对植物影响研究进展 [J]. *作物研究*, 2011, 25(4): 420-424.
- Zhang Y, Li R L, Zhang D S, et al. Research progress on the effect of waterlogging on plants [J]. *Crop Research*, 2011, 25(4): 420-424.
- [42] 列淦文, 叶龙华, 薛立. 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 294-306.
- Lie G W, Ye L H, Xue L. Effects of ozone stress on major plant physiological functions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 294-306.
- [43] Meng Y F, Yin Q, Yan Z J, et al. Exogenous silicon enhanced salt resistance by maintaining K^+/Na^+ homeostasis and antioxidant performance in alfalfa leaves [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 1183.
- [44] 张广华, 刘丹阳, 何硕, 等. 短期盐胁迫下甜菜幼苗的生理伤害和适应变化 [J]. *黑龙江大学工程学报*, 2021, 12(4): 91-96.
- Zhang G H, Liu D Y, He S, et al. Physiological damage and adaptation changes of sugar beet seedlings under short-term salt stress [J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2021, 12(4): 91-96.
- [45] 张腾国, 胡馨丹, 李萍, 等. 盐及低温胁迫对油菜 ROS 和抗氧化酶活性的影响 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 497-505.
- Zhang T G, Hu X D, Li P, et al. Effects of low temperature and salt stress on the activity of ROS and antioxidant enzymes in *Brassica campestris* seedlings [J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2019, 55(4): 497-505.

(上接第 108 页)

- [25] Nottingham A T, Bååth E, Reischke S, et al. Adaptation of soil microbial growth to temperature: using a tropical elevation gradient to predict future changes [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(3): 827-838.
- [26] 高德才, 白娥. 冻融循环期间土壤氧化亚氮排放影响因素 [J]. *植物生态学报*, 2021, 45(9): 1006-1023.
- Gao D C, Bai E. Influencing factors of soil nitrous oxide emission during freeze-thaw cycles [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(9): 1006-1023.
- [27] 祁金花, 黄懿梅, 张宏, 等. 黄土丘陵区不同土地利用下土壤释放 N_2O 潜力的影响因素 [J]. *生态学报*, 2011, 31(13): 3778-3787.
- Qi J H, Huang Y M, Zhang H, et al. Potential soil N_2O emissions and its controlling factors under different land use patterns on Hilly-gully Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3778-3787.
- [28] 桑文秀, 杨华蕾, 唐剑武. 不同土地利用类型土壤温室气体排放对温湿度的响应 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2021(4): 109-120.
- Sang W X, Yang H L, Tang J W. Response of soil greenhouse gas emissions to temperature and moisture across different land-use types [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2021(4): 109-120.
- [29] Gao D C, Zhang L, Liu J, et al. Responses of terrestrial nitrogen pools and dynamics to different patterns of freeze-thaw cycle: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(6): 2377-2389.
- [30] Gao W F, Yao Y L, Liang H, et al. Emissions of nitrous oxide from continuous permafrost region in the Daxing'an Mountains, Northeast China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 198: 34-45.